

# 実河川における流水抵抗の分析

工藤俊<sup>1</sup>・萬矢敦啓<sup>1</sup>・小関博司<sup>2</sup>・笛田俊治<sup>1</sup>・中津川誠<sup>3</sup>

<sup>1</sup>正会員 土木研究所 水工研究グループ水文チーム (〒305-8516 茨城県つくば市南原1-6)

E-mail: s-kudou@pwri.go.jp

<sup>2</sup>正会員 土木研究所 ICHARM (〒305-8516 茨城県つくば市南原1-6)

<sup>3</sup>正会員 室蘭工業大学大学院 工学研究科 (〒050-8585 北海道室蘭市水元町27-1)

本研究は国内外の河川において、aDcpを用いて測定されたデータ及び岸・黒木が提案した $\tau_*-\tau_*'$ 関係に着目して流水抵抗の分析を行う。初めに、姫川/山本地点及び千代田実験水路における観測データは既存の $\tau_*-\tau_*'$ 関係と良く整合した。また、信濃川/臼井橋地点では概ね整合するものの、 $\tau_*-\tau_*'$ 関係の傾きが若干異なり、これは当該地点の相対水深が既存の水路実験のものより大きいことに起因すると推察された。一方、ジャムナ川及びメコン川下流域では既存の $\tau_*-\tau_*'$ 関係とは整合せず、これは当該地点の相対水深及び浮遊砂濃度が非常に高いためと考えられる。そこで、ジャムナ川及びメコン川下流域における抵抗予測を実施するために、観測データを用いて新たに $\tau_*-\tau_*'$ 関係を導出した結果、相対水深を $\tau_*-\tau_*'$ 関係の説明変数として導入することで粗度を良好に予測できた。

**Key Words:** Hydraulic resistance,  $R/d$ , acoustic Doppler current profiler, Field observation

## 1. はじめに

移動床における流水抵抗は、河床の掃流力によりもたらされる流砂現象及び河床形状変化と直接関係し、大きく変化する。特に河床形態の遷移に起因する流水抵抗の急変や二価性は河川管理に不可欠な抵抗予測における重要な問題である。流水抵抗の予測を目的とするアプローチの一つで重要なものとして、全抵抗を河床面の砂粒による表面抵抗と、河床波による形状抵抗に分離する方法がある。Einstein and Barbarossa<sup>1)</sup>は、これらを線形的に分離できると仮定し、径深に着目し表面抵抗分( $R$ )と形状抵抗分( $R'$ )に分離した。Vanoni and Brooks<sup>2)</sup>は、水路実験を実施した上で河床波による抵抗変化を議論しており、上記の分離にも着目して分析した。Engelund<sup>3)</sup>は、米国の河川の計測結果から、相対水深( $R/d$ )と無次元有効掃流力( $\tau_*'$ )の関係は勾配のみに依存することを見出した。これは、フルード相似則を用いることに加えて、無次元有効掃流力の相似則を仮定している。これにより、移動床における流量予測手法を提案した。また、上記の相似仮定から、無次元有効掃流力( $\tau_*'$ )と無次元掃流力( $\tau_*$ )の間には一義的な関係があるとし、Guys et al.<sup>4)</sup>による水路実験結果を用いて $\tau_*-\tau_*'$ 関係を定式化した。さらに、これを用いてRio Grande及びPigion Roost Creekにおける水深-流速関係の遷移現象の説明に成功した<sup>5)</sup>。その後、岸・黒木は

Gilbert<sup>6)</sup>、佐藤ら<sup>7)</sup>の水路実験資料を加えて検討し、Engelundが仮定した相似仮定は特殊な場合を除いては成立しないことを指摘した上で、 $\tau_*-\tau_*'$ 関係式を修正した。具体的には、 $\tau_*'$ は $\tau_*$ のみの関数ではなく、独立変数として $R/d$ を加えた<sup>8)</sup>。また、山本<sup>9)</sup>は多くの水路実験結果及び実河川の観測結果を用いて、流速係数と無次元掃流力と相対水深の関係図を示した。さらに、これら3変数の関係を河床波ごとに分析し、計測資料のない領域でも経験的に推定したことが特徴的である。岸・黒木及び山本がそれぞれ示したダイアグラムは、現在我が国の河道計画における粗度係数の設定に広く用いられている<sup>10)</sup>。なお、実河川で洪水時の流水抵抗を分析した例は、昭和56年8月に石狩川で発生した洪水で河床波を観測・分析した研究<sup>11), 12), 13)</sup>が代表的であり、岸・黒木のダイアグラムとの比較による流水抵抗の分析も行われている<sup>12)</sup>。

以上の流水抵抗と種々の水理量の関係を解明する研究はその目的上、ほとんどが測定条件が良く整備された水路実験の資料を用いてきた。一方、現地観測を用いた分析例は上記で示した例などの一部に留まり、特に水路実験における設定が難しい相対水深が非常に大きい場合や浮遊砂濃度が高い条件における検討例は見当たらない。

一方、近年はacoustic Doppler current profiler (aDcp)を始めとする観測機器の発達<sup>14)</sup>により水中の様々な情報を計測できるようになり、高流速、高濁度条件及び大きな河床

表-1 各地点の諸元

観測地点	観測期間	観測手法	使用したaDcp	データ数	平均勾配	d <sub>50</sub> (mm)	平均R/d	最大Fr	平均Fr	補足
姫川/山本地点	2013年8月23日 2013年9月16日 2013年10月16日	横断観測	WorkHorse ADCP	50	1/110 (河床勾配)	60 (平成22年河床材料調査より)	43	1.04	0.74	<ul style="list-style-type: none"> <li>左岸側に広く植生が繁茂するため、流心のデータのみを使用した。</li> <li>洪水中に水位計が流出したため、河床勾配<sup>17)</sup>を代用。</li> <li>aDcpによる流速観測に不具合が生じたため、電波式流速計(RYUKAN)から得た表面流速に、一般的な流速補正係数である0.85を乗じて平均流速を得た。</li> <li>当該地点の観測の詳細は工藤ら<sup>18)</sup>を参考されたい。</li> </ul>
千代田実験水路	2015年6月25日	縦断観測	RiverPro ADCP	45	1/500	16 (通水後の河床材料調査より)	123	0.64	0.57	<ul style="list-style-type: none"> <li>片道縦断の平均データを使用。</li> <li>水路内の5箇所の水位計から水面勾配を得た。</li> <li>当該地点の観測の詳細はKoseki et al.<sup>19)</sup>を参考されたい。</li> </ul>
信濃川/ 臼井橋地点	2013年6月19日 2013年7月13日 2013年7月30日 2013年8月1日 2014年7月9日	横断観測	WorkHorse ADCP	58	1/5,400	0.6 (平成23年河床材料調査より)	8,627	0.20	0.17	<ul style="list-style-type: none"> <li>断面平均データを使用した。</li> <li>観測地点上下流に設置された6箇所の水位計から水面勾配を得た。</li> </ul>
ジャムナ川	2014年9月 2015年8月 (それぞれ1週間 ~10日程度)	横断観測	RiverRay ADCP	28	1/13,800	0.15 (高知工業高等専門学校 の岡田将治准教授より提供)	48,129	0.21	0.16	<ul style="list-style-type: none"> <li>断面平均データを使用した。</li> <li>水面勾配は図-1に示したSerajganjとSariakandiの水位データから得た。</li> <li>当該地点の観測の概略は岩見ら<sup>20)</sup>に記されている。</li> </ul>
メコン川下流域	2013年12月 2014年10月 2015年9月 2016年9月 (それぞれ1週間 ~10日程度)	横断観測	RiverRay ADCP	175	1/52,400	0.5 (竹林ら <sup>21)</sup> を参考に設定)	30,846	0.14	0.07	<ul style="list-style-type: none"> <li>断面平均データを使用した。</li> <li>水面勾配は図-1に示した水位計のデータから得ており、計測区間①に対してはKampong Cham, Chaktomuk, Neak Loengの水位を用いた。計測区間②に対してはKampong Cham, Chaktomukの水位を用いた。</li> <li>当該地点の観測の詳細は萬矢ら<sup>22)</sup>を参照されたい。</li> </ul>

変動を伴う洪水の観測の成功事例も増えた<sup>15)</sup>。aDcpによる観測から、高解像度の流速分布や水深など、これまで実河川の洪水中に計測が困難とされた水理量が得られるようになったが、洪水中の流水抵抗に着目し複数の河川の観測結果を用いて統一的に分析した例はない。そこで本研究では、国内外でaDcpによるデータを用いて流水抵抗を分析した。すなわち、岸・黒木が提案した $\tau^*$ と $\tau'^*$ の関係と観測データを比較し、それらが適合する場合とそうでない場合を示した。さらに、適合しない場合は、既存の $\tau^*$ と $\tau'^*$ の関係が構築された水理条件との違いを考察した上で、新たな $\tau^*$ と $\tau'^*$ 関係を導出して抵抗予測を実施した。

## 2. 観測データ

本研究で流水抵抗の分析にあたり観測が必要な水理量は、平均流速、水深、勾配、粒径である。基本的には、平均流速及び水深はaDcpから得ており、勾配は複数の水位計から得た水面勾配を用いた。粒径は河床材料調査から得た $d_{50}$ を用いた。また、aDcp観測データは上層及び下層それぞれに不感帯が存在するため、これを外挿補間して平均流速を算出した。今回は、上層不感帯は4手法(Power法, 3 point slope法, Constant法, Log法)の平均を用い、下層不感帯はPower (No slip)法を用いた。Log法は観測データを対数近似して外挿補間する方法で、残りの外挿方法は、例えばWinRiver II User's Guide<sup>16)</sup>に記されている。ここで、表-1に今回対象とする5地点の観測された水理量などの諸元を示す。なお、本論文の表



図-1 ジャムナ川及びメコン川下流域

記でaDcpとADCPを併用するが、aDcpはacoustic Doppler current profilerの総称で、ADCPは特定機種の名義の一部である。表-1に着目すると、いずれの水理量でも値が広く幅を持ち、総合的な議論のために十分なデータが揃っていると判断できる。特に、 $R/d$ の値が小さい姫川では43である一方で、ジャムナ川では48,129である。最大 $Fr$ についても、メコン川下流域は0.14である一方で、姫川では1.04と非常に大きい。 $R/d$ 及び $Fr$ は小規模河床波の形態及びそれによる流水抵抗に大きく関わる水理量であるため、広い幅の値を持つことが特に重要となる。

## 3. 流水抵抗の分析

### (1) 分析手法

本研究では $\tau^*$ と $\tau'^*$ 関係に着目した分析を行う。 $\tau^*$ と $\tau'^*$ の間には以下の関係がある。

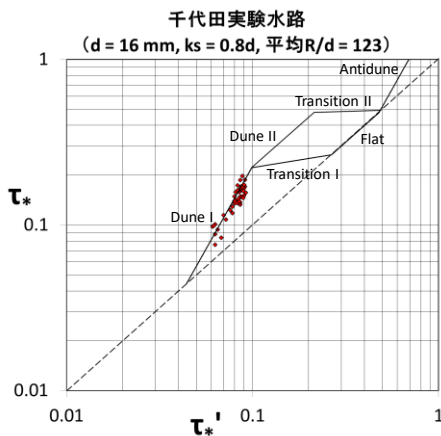


図-2 千代田実験水路の流水抵抗

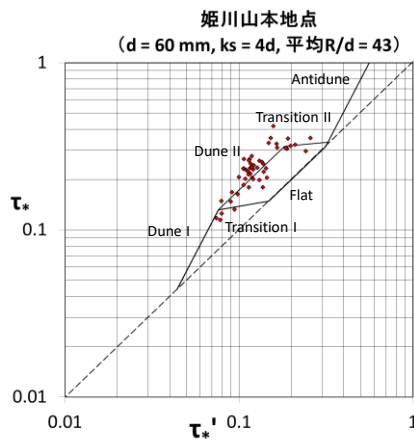


図-3 姫川/山本地点の流水抵抗

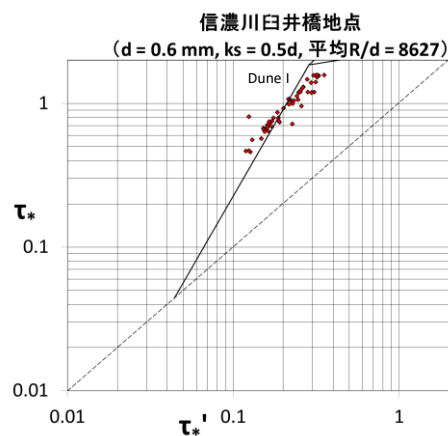


図-4 信濃川/臼井橋地点の流水抵抗

$$\tau_* = \tau_*' + \tau_*'' \quad (1)$$

ここで、 $\tau_*''$ は無次元掃流力のうち形状抵抗分である。

(1)式は、 $\tau_*'$ は $\tau_*'$ と $\tau_*''$ の重ね合せであることを仮定しており、小規模河床波が発達して形状抵抗が増加すると、 $\tau_*''$ が増加して $\tau_*$ における $\tau_*'$ が占める割合が減少する関係にある。 $\tau_*''$ を直接算出するには小規模河床波の波高及び波長を得る必要がある一方で、 $\tau_*-\tau_*'$ 関係を分析することで小規模河床波を直接計測せずに流水抵抗を調べることができる。ここで、 $\tau_*$ と $\tau_*'$ は以下の通りである。

$$\tau_* = \frac{RI}{sd} \quad (2)$$

$$\tau_*' = \frac{R'I}{sd} \quad (3)$$

ここで、 $R$ は径深であり、本研究では近似的に水深として扱う。 $I$ は勾配、 $d$ は粒径である。 $s$ は河床材料の水中比重で本研究では1.65を用いる。 $R'$ は平坦河床見合いの径深で、以下に示す通り流速に関する水理量である。

$$\frac{U}{\sqrt{gR'I}} = 8.5 - \frac{1}{\kappa} + \frac{1}{\kappa} \ln \frac{R'}{k_s} \quad (4)$$

ここで、 $U$ は平均流速、 $\kappa$ はカルマン係数で本研究では0.4を用いる。 $k_s$ は相当粗度である。 $k_s$ は粒径の数倍( $md$ )とされ、 $m$ は様々な値が報告されており、例えば芦田<sup>23)</sup>は平均粒径の0.5~4.0倍の範囲で変化すると述べた。

## (2) 分析結果

図-2、図-3は千代田実験水路及び姫川/山本地点の流水抵抗の分析結果を示す。 $\tau_*$ は式(2)から求め、 $\tau_*'$ は式(4)から $R'$ を算出した上で式(3)から求めた。ここで、 $k_s=md$ の $m$ の値は、後述の図-4も含めて、岸・黒木の $\tau_*-\tau_*'$ 関係(実線)の周囲に分布するように与えた。なお、図中には各実線に対応する河床形態を示し、破線は $\tau_*-\tau_*'$ を表す。これは $\tau_*''=0$ 、すなわち形状抵抗が無く平坦河床であることを意味する。千代田実験水路について、観測データがDune Iの範囲で岸・黒木が提案したものと良く整合する。姫川では、Dune IIに沿って分布するデータと、Transition IIに沿って分布するデータがある。すなわち、

表-2 各地点の粒径と  $m$  の値

	D10	d60	d90	均等係数 (d60/d10)	同定された $m$ の値
信濃川/臼井橋地点	0.3 mm	0.6 mm	0.8 mm	2	0.5
千代田実験水路	2.5 mm	20 mm	50 mm	8	0.8
姫川/山本地点	2.0 mm	100 mm	300 mm	50	4.0

これら2地点では、Dune I、Dune II、Transition IIいずれの範囲でも、岸・黒木の $\tau_*-\tau_*'$ 関係は観測データを正確に予測でき、特に、姫川でプロットが水平に並ぶこと、つまり抵抗の急激な減少は河床形態が遷移河床に達したためと解釈できる。なお、姫川はデータが比較的ばらつく傾向がある。この要因の一つは、表面流速から平均流速を求める流速補正係数であると考えられる。当該地点では表-1に示す通り表面流速に0.85を乗じて平均流速を算出したが、実際は0.85の周りにある程度ばらつくと考えられる。これについては更なる精査が必要である。

図-4は信濃川/臼井橋地点の $\tau_*-\tau_*'$ 関係である。観測データは岸・黒木の $\tau_*-\tau_*'$ 関係に沿って分布し、同関係は当該地点の抵抗変化を説明できると考える。一方、岸・黒木の $\tau_*-\tau_*'$ 関係と観測データの傾きが若干異なるようにも見受けられる。臼井橋地点と既存の水路実験の水理条件の違いについて、岸・黒木の $\tau_*-\tau_*'$ 関係は、水路実験データを $Rd$ について50、100、500、1,000に分類して導出された上で、 $Rd$ が最大3,500程度の現地観測によるデータ群の流水抵抗を説明できることが示された<sup>24)</sup>。一方、当該地点の平均 $Rd$ は約8,600と非常に大きい。これは岸・黒木の $\tau_*-\tau_*'$ 関係の適用範囲を示唆するものと考えられる。

なお、表-2は3地点の粒径と $m$ の値を整理したものである。 $m$ の値は芦田<sup>23)</sup>が示した0.5~4.0の範囲内にあり、 $m$ と均等係数は比例関係にある。均等係数は粒度の良さを表すことを踏まえて考察すると、均等係数が大きい場合は大粒径が比較的多く存在し、それが相当粗度を大きくする可能性がある。一方、均等係数が小さい場合は $d_{50}$ よりも大きな粒径が比較的少ないため、 $m$ の値が小さく同定されると考える。なお、表-2には参考として $d_{90}$ の値も掲載した。 $d_{90}$ を $k_s$ と関連付ける研究例<sup>25)</sup>もあり、実験水路よりも粒度条件がさらに複雑と考えられ



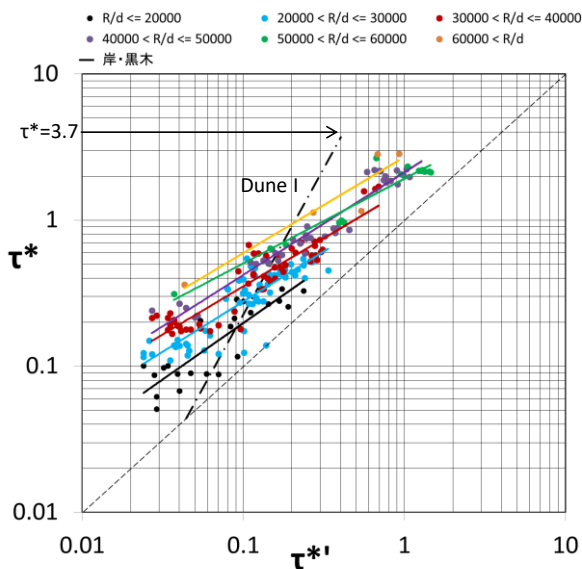


図-5 ジャムナ川及びメコン川下流域の流水抵抗

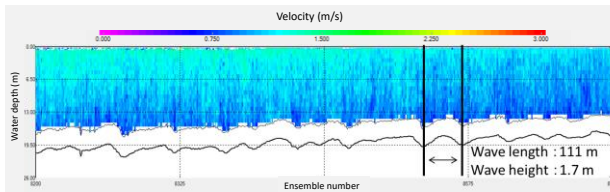


図-6 メコン川下流域の河床波  
(波長の標準偏差: 30 m, 波高の標準偏差: 0.4 m)

る実河川の  $k_s$  と粒径の関係は更なる精査が必要である。

図-5 はジャムナ川及びメコン川下流域の観測データを用いたものである。ここで、当該地点は  $k_s=2d$  を用いた。当該地点の  $R/d$  は  $10^4$  オーダーと非常に大きい。一点鎖線は岸・黒木が示した Dune I の  $\tau^*-\tau^*$  関係である。参考までに、岸・黒木<sup>8)</sup>が示した遷移河床が発生し始める  $\tau^*$ 、すなわち Dune I の上限となる  $\tau^*$  を、図-5 中の全データの平均の  $R/d(=33,699)$  から計算すると、3.7 である。今回の観測データの  $\tau^*$  は全てこれより小さい。また、表-1 の  $Fr$  の値から、当該地点の最大値は 0.21 である。この値からは、河床形態は砂澁または砂堆であると推察されるが、一点鎖線で示される Dune I と観測データを比較すると、両者は大きく異なる傾向を示す。これは、当該地点の  $R/d$  の値が、岸・黒木の  $\tau^*-\tau^*$  関係の適用範囲を超えるためと考えられる。また、データは大きくばらつく。一方、 $R/d$  に応じてデータを分類すると、各分類ではばらつきが小さくなる。ここで、当該地点のデータで粘性底層の厚さを調べると、 $k_s$  と同じオーダーであり、滑面と粗面との遷移領域であった。そこで、このような水理条件では粒子レイノルズ数( $Re_*$ )が抵抗特性に深く関係すると考え、これによる分類も行ったが、明確な傾向は確認できなかった。粒子レイノルズ数による分析を実施する上では、粒径が非常に大きな影響を持つ。今回は粒径を河川ごとに一定で与えたため、これをさらに緻密に精査する必要があると考える。図-5 において、各分類

で累乗近似の最小二乗法による近似線を設けると、 $R/d$  の増加とともに、図における切片が増加する傾向が確認できる。また、この近似線に沿って  $\tau^*$  が増加する時、 $\tau^*=\tau^*$  で示す破線に近づくことが特徴的である。すなわち、 $\tau^*$  の増加に伴い、形状抵抗が減少する。この関係は、RiverRay ADCP を用いた縦断観測結果からも確認できる。図-6 は、図-1 の計測区間①の上流で実施された縦断観測結果の一部を示す。河床波の波高及び波長が明確に表れる。これは洪水期である 2014 年 10 月 12 日の観測結果で、平均的な河床波の波長は 111 m、波高は 1.7 m であった。一方、乾季である 2013 年 12 月 15 日の平均的な河床波の波長は 87 m、波高は 3.1 m であった。両者を比較すると洪水期の方が波長が長く波高は低い。すなわち、洪水期の方が河床波による形状抵抗が小さく、これは上記の  $\tau^*$  の増加と形状抵抗の減少の関係を整合する。

この結果の大きな要因として、浮遊砂の影響が考えられる。Fredsoe<sup>26)</sup>は、掃流砂と浮遊砂の双方を考慮した上で、流砂量の連続式に基づいて河床波の波高を予測した。そして、予測結果は水路実験結果と整合することを示すとともに、浮遊砂量が多い場合に無次元有効掃流力が増加すると河床波の波高は減少することを示した。さらに、Amsler<sup>27)</sup>はパラナ川の洪水時の観測結果を用いて、浮遊砂量( $q_s$ )と掃流砂量( $q_b$ )の比と砂堆の波高の関係を整理し、 $q_s/q_b$  が大きい場合は、流量と砂堆の波高は反比例することを指摘し、これは上述の Fredsoe<sup>26)</sup>が示した知見と整合すると述べた。また、浮遊砂濃度の増加がカルマン係数の減少を通じて流水抵抗を減少させることは古くから指摘されており<sup>8),24)</sup>、浮遊砂が卓越する当該地点では特に重要な要素となっている可能性がある。

### (3) ジャムナ川及びメコン川下流域の抵抗予測

当該地点の流水抵抗は既存の  $\tau^*-\tau^*$  関係では表現できないことから、観測データを用いて新たな  $\tau^*-\tau^*$  関係を導出した上で、抵抗予測を試みる。表-3 は、 $R/d$  における分類毎の、データ数、平均  $R/d$  の値、累乗近似の最小二乗法による近似線の係数を示す。ここで、平均  $R/d$  の値と近似線の係数に着目すると、 $\alpha$  は  $R/d$  に反比例する。一方、 $\beta$  は明確な傾向がなく、約 1.5 を平均とする値となる。ここで、 $R/d$  を独立変数として  $\alpha$  を累乗近似で表現すると、以下の式を得る。

$$\alpha = 1.1 \times 10^4 \left( \frac{R}{d} \right)^{-0.97} \quad (5)$$

なお、式(5)により推定した  $\alpha$  と表-3 の  $\alpha$  の決定係数( $R^2$ )は 0.95 であり、式(5)は表-3 の  $R/d$  と  $\alpha$  の関係を十分正確に表現することが確認できる。また、 $\beta$  を定数 3/2 に置き換えると、以下の  $\tau^*-\tau^*$  関係が導出される。

$$\tau^* = 1.1 \times 10^4 \left( \frac{R}{d} \right)^{-0.97} \tau^* \frac{3}{2} \quad (6)$$

表-3 近似線の係数

	データ数	平均R/d	$\tau^* = \alpha \tau + \beta$	
			$\alpha$	$\beta$
R/d ≤ 20,000	24	16,480	0.819	1.297
20,000 < R/d ≤ 30,000	61	25,361	0.649	1.458
30,000 < R/d ≤ 40,000	55	34,598	0.489	1.521
40,000 < R/d ≤ 50,000	43	44,229	0.341	1.424
50,000 < R/d ≤ 60,000	15	52,521	0.324	1.727
60,000 < R/d	5	61,164	0.220	1.522

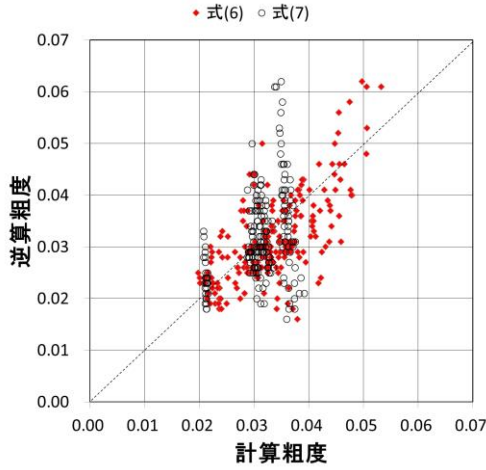


図-7 抵抗予測結果

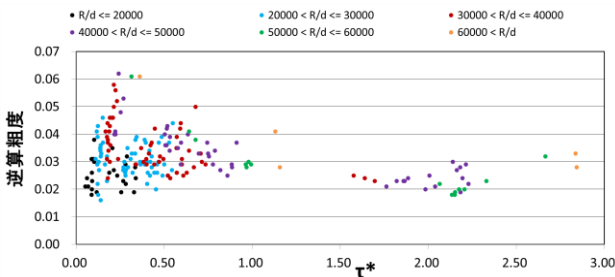


図-8  $\tau_*$ と逆算粗度の関係

式(6)は岸・黒木が提案した既存の  $\tau_*$ - $\tau^*$ 関係と同様の形である。すなわち、 $\tau_*$ に累乗が付加され、さらに  $R/d$  に累乗が付加された項を係数として持つ。これを用いて抵抗予測を試みる。なお、式(6)は今回の観測データから得られた経験式であり、これをそのまま他のデータに適用するものではなく、今回観測された流水抵抗変化を説明するものと解釈される。図-7 は抵抗予測の結果を示す。式(6)から計算した粗度と、マンニング式から計算した逆算粗度を比較するものである。また、 $R/d$  を導入する効果を調べるために、図-5 の全データを累乗近似の最小二乗法により近似した以下の  $\tau_*$ - $\tau^*$ 関係を用いた予測結果も合わせて示した。

$$\tau_* = 0.422\tau_*^{1.24} \quad (7)$$

なお、具体的な粗度の計算手順は以下の通りである。

- 1) 式(2)から  $\tau_*$  を求める。
- 2) 式(6)または式(7)から  $\tau^*$  を求める。
- 3) 式(3)から  $R'$  を求める。
- 4) 式(4)から平均流速を求め、これと水深、勾配からマンニングの平均流速公式により粗度係数を得る。

図-7 に着目すると、式(6)による計算粗度は逆算粗度を概ね良好に再現でき、式(7)と比較すると、特に粗度が大きい場合にそれを良く予測できる。図-8 は、 $\tau_*$ と逆算粗度の関係を示す。これによると、 $\tau_*$ が大きい場合は逆算粗度は 0.02~0.03 程度であるのに対して、 $\tau_*$ が小さい場合は最大で 0.06 程度まで広く分布する。また、 $R/d$  が大きいデータは逆算粗度が大きい傾向にある。式(6)を用いる場合は、 $\tau_*$ と  $R/d$  の双方が説明変数であるため、図-8 で  $\tau_*$  が小さくかつ  $R/d$  が大きい時の粗度である 0.06 程度の値を的確に予測できるが、式(7)では  $R/d$  を説明変数に用いないため、 $\tau_*$  が小さい時の平均的な粗度である 0.04 程度が計算粗度の最大となり、それ以上の値を予測できない。よって、当該地点の流水抵抗を予測する際にも、 $R/d$  を変数として導入することが極めて重要である。

#### 4. まとめ

国内外で aDcp による観測データを用いて流水抵抗を分析した結果、以下の成果が得られた。

- 1) 千代田実験水路及び姫川/山本地点では、観測データと岸・黒木が提案した  $\tau_*$ - $\tau^*$ 関係が良く整合する。特に、姫川における流水抵抗の急激な減少が遷移河床として説明された。
- 2) 信濃川/臼井橋地点では、岸・黒木が提案した  $\tau_*$ - $\tau^*$ 関係と概ね整合するが、その傾きが若干異なる。これは、既存の  $\tau_*$ - $\tau^*$ 関係を構築した際の水利条件との違い、すなわち  $R/d$ の違いに起因すると考える。
- 3) ジャムナ川及びメコン川下流域の流水抵抗は、既存の  $\tau_*$ - $\tau^*$ 関係では予測できない傾向を示した。当該地点は浮遊砂が卓越する特徴があり、これによる抵抗減少効果によるものと推察される。
- 4) ジャムナ川及びメコン川下流域の流水抵抗を予測するために、新たな  $\tau_*$ - $\tau^*$ 関係を検討し、実際に抵抗予測を実施した。この結果、当該地点でも  $R/d$  を独立変数に加えることは極めて重要であり、これにより良好に抵抗予測ができた。

謝辞：本研究を実施するにあたり、北海道開発局帯広開発建設部から千代田実験水路におけるデータを提供して頂いた。北陸地方整備局高田河川国道事務所から姫川/山本地点におけるデータを提供して頂いた。同信濃川下流河川事務所から信濃川/臼井橋地点におけるデータを提供して頂いた。また、メコン河委員会事務局から水位データを提供して頂いた。カンボジアの国家災害対策委員会(NCDM)及び水資源・気象庁(MOWRAM)からメコン川の観測許可を頂いた。バングラデシュの水資源開発庁(BWDB)から水位データ及びジャムナ川の観測許可を頂いた。高知工業高等専門学校の岡田将治准教授からジャ

ムナ川の河床材料調査結果を提供して頂いた。また、土木研究所 ICHARM の江頭進治研究・研修指導監から本研究の遂行にあたり種々のご助言を頂いた。ここに記して謝意を表する。

## 参考文献

- 1) Einstein, H. A. and Barbarossa, N. L.: River channel roughness, Trans. ASCE, Vol. 117, Paper No. 2528, 1952.
- 2) Vanoni, V. A. and Brooks, N. H.: Laboratory studies of the roughness and suspended load of alluvial streams, Report No. E-68, Sedimentation laboratory, California Institute of Technology, Pasadena, California, Dec, 1957.
- 3) Engelund, F.: Hydraulic resistance of alluvial streams, Journal of the Hydraulics Division, ASCE, Volume 92, No. HY-2, pp.315-326, 1966.
- 4) Guys, H. P., Simons, D. B. and Richardson, E. V.: Summary of alluvial channel data from flume experiments 1956-61, USGS Professional Paper 462-I, 1966.
- 5) Engelund, F.: Closure to "Hydraulic resistance of alluvial streams," Journal of the Hydraulics Division, ASCE, Volume 93, No. HY-4, pp.287-296, 1967.
- 6) Gilbert, G. K.: Transportation of debris by running water, USGS Professional Paper 86, 1914.
- 7) 佐藤清一, 吉川秀夫, 芦田和男: 河床砂礫の掃流運搬に関する研究, 建設省土木研究所報告, 第 98 号, 1957.
- 8) 岸力, 黒木幹男: 移動床流れにおける河床形状と流体抵抗 (I), 北海道大学工学部研究報告, pp.1-23, 1973.
- 9) 山本晃一: 構造沖積河川学-その構造特性と動態-, 山海堂, 2004.
- 10) 例えば, 一般財団法人土木技術研究センター: 河道計画検討の手引き, 山海堂, 2002.
- 11) 高木譲治, 牧野成雄, 竹本成行, 森田康志: 石狩川下流部における洪水流と河床変動の観測, 第 26 回水理講演会論文集, pp.57-62, 1982.
- 12) 板倉忠興, 山口甲, 清水康行, 岸力, 黒木幹男: 昭和 56 年 8 月洪水における石狩川下流部での河床波観測について, 第 30 回水理講演会論文集, pp.481-486, 1986.
- 13) 平井康幸, 泉典洋, 伊藤丹: 昭和 56 年 8 月石狩川洪水における同時水位観測による河床抵抗の挙動特性の検討, 河川技術論文集, 第 20 巻, pp.235-240, 2014.
- 14) 萬矢敦啓, 岡田将治, 橘田隆史, 深見和彦: 日本における ADCP を用いた高水流量観測手法, 河川流量観測の新時代, 第 2 巻, pp.34-41, 2011.
- 15) Yorozuya, A., Motonaga, Y., Iwami, Y., Furuyama, T., and Ogiwara, K.: Water Discharge Measurement with aDcp in High Speed Flow with High Sediment Concentration, 9th International Symposium on Ultrasonic Doppler Methods for Fluid Mechanics and Fluid Engineering, pp. 21-24, 2014.
- 16) TEREDYNE RD INSTRUMENTS: WinRiver II User's Guide, pp.50-51, 2008.
- 17) 国土交通省河川局, 姫川水系河川整備基本方針, 2008.
- 18) 工藤俊, 萬矢敦啓, 小関博司, 笛田俊治, 中津川誠: 洪水水中の河床変動を考慮した流量の推定, 土木学会論文集 G (環境), Vol.72, No.5, pp.1313-1320, 2016.
- 19) Koseki, H., Yorozuya, A., Kudo, S., Iwami, Y., Kitsuda, T.: Development of a system to measure bed forms and vertical velocity profiles in a river channel, River Flow 2016, Taylor & Francis Group, London, pp.1557-1565, 2016.
- 20) 岩見洋一, 萬矢敦啓, 工藤俊: aDcp (超音波多層型三次元流向流速計) を用いた海外における観測とその活用事例, 土木技術資料, Vol.57, No.5, pp.42-43, 2015.
- 21) 竹林洋史, 中元達也, 藤田正治: 粘性・非粘性河床材料混在場における土砂輸送特性-トンレサップ川を対象として-, 京都大学防災研究所年報, 第 52 号 B, pp.637-645, 2009.
- 22) 萬矢敦啓, 本永良樹, 岩見洋一: 大陸河川における ADCP を用いた流況・流量・河床高観測の注意点と観測結果の一例, 河川流量観測の新時代, 第 4 巻, pp.48-56, 2014.
- 23) 芦田和男: 河道の設計法(4)-河川の粗度について-, 土木技術資料, 1-7, 1959.
- 24) 水理委員会移動床流れの抵抗と河床形状研究小委員会: 移動床流れにおける河床形態と粗度, 土木学会論文報告集, 第 210 号, 1973.
- 25) Chang, H. H.: Fluvial Processes in River Engineering, John Wiley & Sons, Inc., 1988.
- 26) Fredsoe, J.: Unsteady flow in straight alluvial streams. Part 2. Transition from dunes to plane bed, J. Fluid Mech, vol 102, pp.431-453, 1981.
- 27) Amsler, M. L., Schreider, M. I.: Dunes height prediction at floods in the Parana River, Argentina, River Sedimentation, Jayawardena, Lee & Wang (eds), Balkema, Rotterdam, pp.615-620, 1999.

(2016. 9. 30 受付)

## ANALYSIS OF HYDRAULIC RESISTANCE WITH FIELD OBSERVATION DATA

Shun KUDO, Atsuhiko YOROZUYA, Hiroshi KOSEKI, Toshiharu FUETA and Makoto NAKATSUGAEA

This study aims to analyze hydraulic resistance with field observation data obtained by acoustic Doppler current profilers. We focused on the  $\tau_*-\tau_*'$  relation proposed by Kishi & Kuroki, and compared it with the observed data. They showed a quite good agreement in the Hime river and the Chiyoda experimental channel. In addition, the  $\tau_*-\tau_*'$  relation and the observed data in the Shinano river also showed a reasonable agreement although they have a bit difference in terms of the slope of the  $\tau_*-\tau_*'$  relation. One of the reasons of the difference is likely to be the value of  $R/d$  in the field which is much higher than that of precedence researches. In contrast, observed data in the Jamuna river and the lower Mekong river showed a totally different tendency from the  $\tau_*-\tau_*'$  relation. It is inferred that high concentration of suspended sediment and high  $R/d$  value cause the difference. To conduct a prediction of roughness in the Jamuna river and the lower Mekong river, a new  $\tau_*-\tau_*'$  relation was derived with the observed data. It is showed that the new  $\tau_*-\tau_*'$  relation is capable to predict roughness coefficient reasonably by taking  $R/d$  into consideration.